

## Mission Rosetta

BEAUVIEUX C., LE VERGE-SERANDOUR M.

19 décembre 2015

# Table des matières

<b>1 Généralités</b>	<b>3</b>
1.1 La mission Rosetta, l'étude des comètes . . . . .	3
1.2 Objectifs . . . . .	4
1.3 Historique et déroulement de la mission . . . . .	5
<b>2 La mission</b>	<b>8</b>
2.1 Churyumov-Gerasimenko : caractéristiques de la comète . . . . .	8
2.2 Rosetta . . . . .	8
2.3 Philae . . . . .	17
<b>3 Problèmes, solutions technologiques et résultats</b>	<b>24</b>
3.1 Défis technologiques, problèmes et solutions . . . . .	24
3.1.1 Un très long voyage . . . . .	24
3.1.2 Le rendez-vous . . . . .	25
3.1.3 L'atterrissement de Philae . . . . .	25
3.2 Des premiers résultats . . . . .	26
3.2.1 Résultats de Rosetta - MIRO, ROSINA, VIRTIS . . . . .	26
3.2.2 Résultats de Philae - COSAC, PTOLEMY, SD2 . . . . .	28
<b>Bibliographie</b>	<b>30</b>

# Introduction

Le 12 novembre 2014, le Centre européen d'opérations spatiales explose de joie : après un périple de plus de dix ans, une sonde spatiale a accompli l'exploit de se poser sur une comète, à plus de 3,5 unités astronomiques de la Terre. La mission Rosetta, partie en 2004, est parvenue à bon port, et s'apprête à tenter de percer les nombreux secrets des comètes.

# Chapitre 1

## Généralités

### 1.1 La mission Rosetta, l'étude des comètes

Les comètes ont toujours fasciné les Hommes : ces objets célestes sont depuis bien longtemps restés mystérieux. Autrefois perçues comme annonciatrices de malheur, les comètes ont depuis bien longtemps été représentées dans l'imagerie collective.

Des nombreuses explications fleurirent pour expliquer les comètes : Aristote place les comètes dans le monde sublunaire, et seraient des "phénomènes atmosphériques de la sphère de l'air remontant dans la sphère du feu". Les disciples de Pythagore lui préfèrent des planètes rarement observables.

Il faudra attendre la Renaissance et l'astronome Johann Müller pour que naisse la cométographie. De nombreux astronomes étudièrent ces curieux phénomènes, ne comprenant pas encore quelle était la véritable nature de ces objets célestes. De la mise en évidence des vents solaires grâce à la queue des comètes, à la périodicité et à la prédiction de Edmond Halley sur la prochaine apparition (en 1758) de la comète qui porte aujourd'hui son nom, leur véritable nature ne fut que découverte que tardivement et ce avec l'avènement de la conquête spatiale. Dans les années 90, la NASA et l'ESA souhaitaient déjà étudier les comètes de bien plus près que ce qui avait été fait depuis. Les missions spatiales précédentes ayant été des succès (notamment la mission GIOTTO en 1986, qui étudia la comète de Halley et Grigg-Skjellerup en 1992), les deux agences spatiales commencèrent à se pencher sur le projet. Malheureusement, à cause de soucis financiers, la NASA se retira du projet, laissant l'ESA s'en charger. La mission Rosetta est validée par l'ESA en 1993 et porte le nom symbolique de la pierre de Rosette, qui aida Champollion à déchiffrer les hiéroglyphes égyptiens, avec l'aide de l'obélisque de Philae. Enfin, la mission est l'une des pierres angulaires du programme Horizon 2000, accompagnée des missions SOHO (étude du Soleil), Herschel (observations dans l'infrarouge) et XMM-Newton (observations des rayons X).

Si les comètes fascinent tant et toujours, c'est qu'elles pourraient bien être la clé de certains mystères. En effet, les observations ont démontré que les comètes étaient en parties composées d'eau et de molécules complexes... essentielles pour la vie. Par ailleurs, il est admis que les planètes et les comètes partagent des origines communes, et les renseignements que les comètes pourraient nous donner



FIGURE 1.1 – La comète de Halley sur la tapisserie de Bayeux

nous permettrait de comprendre plus encore les premières étapes de la formation du Système Solaire.

## 1.2 Objectifs

Rosetta est l'une des missions les plus ambitieuses de ces vingt dernières années. Troisième pivot du programme scientifique obligatoire "Horizon 2000", elle a comme objectif premier l'étude de la comète 67P-Churyumov-Gerasimenko (abrégé en Chury). Trois axes de recherches ont été sélectionnés par l'ESA, l'agence spatiale européenne, en vu de découvrir et collecter des informations sur les comètes. Ces trois axes sont : comprendre la structure interne du noyau, observer l'interaction du vent et de la pression solaire avec le noyau, et enfin, connaître la composition aussi bien minéralogique, isotopique que chimique du corps céleste. Ce dernier point observe un intérêt particulier pour la composante carbonée de la comète.

En vue de parvenir à ces trois objectifs, la mission se compose de deux modules, un orbiteur nommé Rosetta et un atterrisseur nommé Philae. Ainsi, il peut y avoir une observation en orbite autour de la comète, notamment afin d'observer la pression radiative et l'impact du vent solaire, et dans le même temps des mesures au sol permettant d'en apprendre davantage sur sa composition et la structure de son noyau.

L'autre enjeu de taille de programme se situe dans sa durée. Un trajet de dix ans avant de pouvoir rejoindre l'astre. Il y a donc eu un travail colossale aussi bien pour le transport des modules que pour les transferts des données. C'est en faisant appel à des calculs de trajectoires complexes et l'utilisation de l'assistance gravitationnelle que cela fut réalisable. 1,7 tonnes de carburants, trois impulsions sur Terre et une sur Mars ont été nécessaires pour rattraper Chury. D'ailleurs, ce n'était pas la comète initialement choisie mais un retard de l'ESA a forcé l'organisation à la sélectionner. Notons que lors de son voyage, elle a contribué à l'observation de Mars ainsi que l'étude de l'impact du Deep Space sur les satellites.

### 1.3 Historique et déroulement de la mission

La mission Rosetta débuta le 2 mars 2004, avec le lancement de la sonde grâce au lanceur Ariane-5. En mars 2005, Rosetta utilisa une première assistance gravitationnelle avec la Terre, puis en Février 2007 avec Mars et en Novembre 2007 avec la Terre, et enfin en Novembre 2009 une dernière fois avec la Terre. Le 5 Septembre 2008, la sonde survola l'astéroïde Steins et en Juillet 2010, l'astéroïde Lutétia. En janvier 2011, la sonde accéléra via ses propres moteurs, pour entrer en hibernation de Juin 2011 à Janvier 2014 (Mars pour Philae). La deuxième phase de la mission pouvait alors commencer : entre Mai et Juin 2014, la sonde freina pour qu'enfin en Septembre 2014, Rosetta puisse orbiter autour de la comète 67P - Churyumov Gerasimenko. Entre Août et Octobre, la sonde sélectionna 5 sites d'atterrissement : c'est la phase la LSSP (Landing Site Selection Process), effectuée grâce à l'instrument OSIRIS.

Parmi les cinq différents sites d'atterrissement, les ingénieurs et les scientifiques en choisirent un : le site J comme le montre la figure 1.2, plus en détail sur la figure 1.3. Après avoir sélectionné le site d'atterrissement, une nouvelle phase, la LDP (Landing Delivery Preparation), s'amorce une fois que les contraintes suivantes sont connues : la trajectoire d'observation proche, la trajectoire de préparation à la séparation, la trajectoire de descente et d'atterrissement de Philae, et enfin la trajectoire post-séparation (dont manœuvres d'orbite pour s'éloigner de la comète), et toutes les contraintes internes à Philae (températures, rendements des piles, batteries, convertisseurs, etc.) mais aussi externes (durée de la descente, transfert des données, travail de jour ou de nuit, etc.). Après ces deux premières séquences, une troisième phase arrive : la SDL (Separation, Descent, Landing). C'est l'heure de vérité, la phase la plus complexe et risquée. Cette phase se déroula le 12 novembre 2014, Philae atterrit enfin sur la comète 67P. Une fois sur le sol de la comète, une nouvelle séquence s'active : celle de la mission scientifique, la FSS (First Science Sequence). Au total, 3 blocs d'opérations sont prévus, dans l'ordre :

1. CONSERT, ROMAP
2. SD2, COSAC, PTOLEMY
3. MUPUS, SESAME, APXS
4. SD2, COSAC, PTOLEMY.

Cette séquence était initialement prévue sur une durée de 2,5 jours, mais elle ne dura que 57 heures en réalité, à cause de la mauvaise position de Philae (partiellement inclinée). Enfin, la dernière séquence, la LTS (Long Term Science), qui

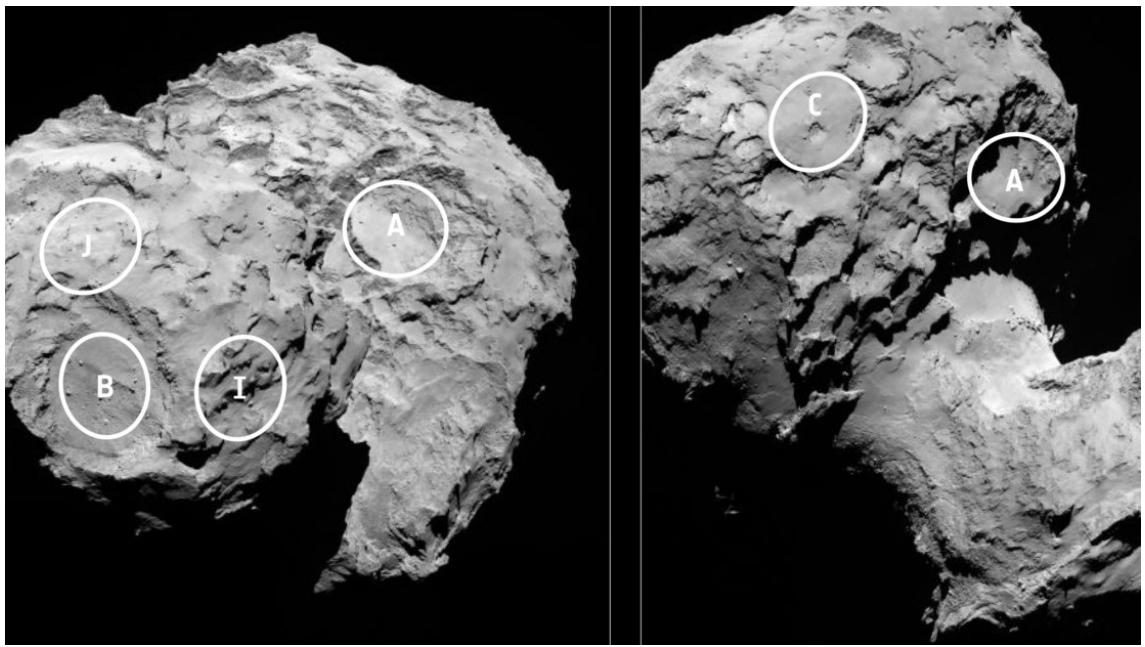


FIGURE 1.2 – Les sites d'atterrissement de la sonde Philae sur 67P.

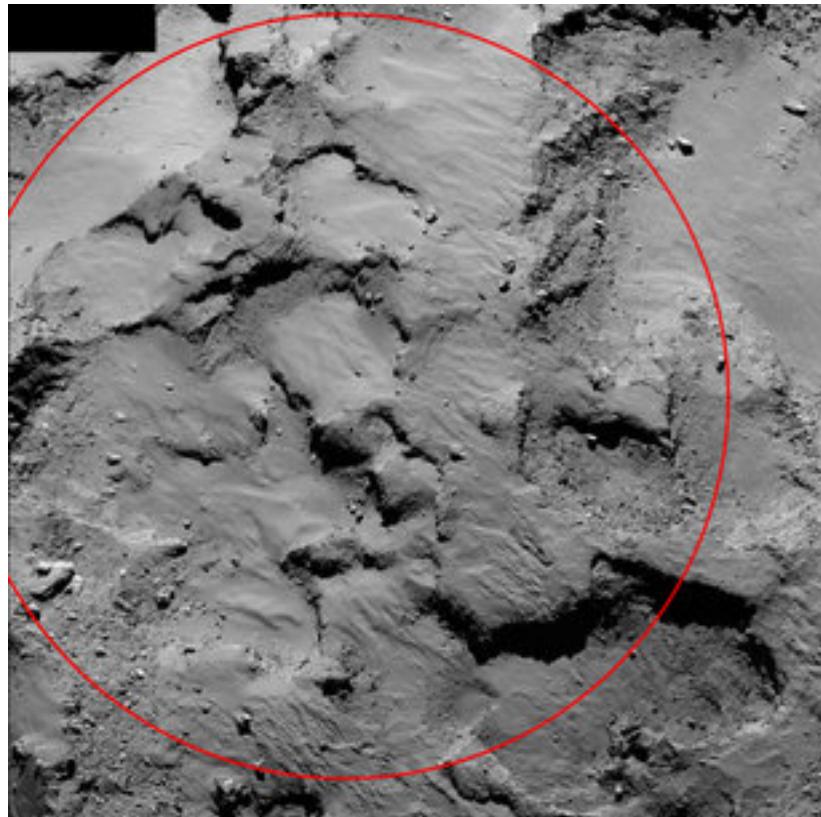


FIGURE 1.3 – Le site J (vue à 30 km d'altitude).

s'étala de l'hiver au printemps 2015, est une phase s'appuyant sur les batteries rechargeables. Initialement, Philae devait pouvoir recharger ses batteries tous les deux jours, cependant, ce ne fut pas le cas, mais nous y reviendront dans la partie Problèmes. Une fois la LTS achevée, la mission de Philae toucha à sa fin... Mais pas Rosetta : la mission nominale de l'orbiteur se poursuivra jusqu'au 31 décembre 2015, pour peut être continuer à nous envoyer quelques données après cette date.

# Chapitre 2

## La mission

### 2.1 Churyumov-Gerasimenko : caractéristiques de la comète

Il convient de présenter la cible avant même de s'attaquer à la sonde en elle-même. Cette cible, c'est la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko : il s'agit tout simplement de la soixante septième comète périodique découverte par Churyumov et Gerasimenko<sup>1</sup>, d'où ce nom.

Les comètes, contrairement aux astéroïdes qui sont des blocs rocheux de tailles variables<sup>2</sup>, les comètes sont de petits congolérats<sup>3</sup> de grains de poussière et de gaz congelés.

Les trajectoires des comètes connues sont fortement elliptiques, et elles passent périodiquement à côté du Soleil, ce qui provoque à la fois un dégazage dû à la sublimation des gaz congelés soumis à la forte température cinétique des vents solaires, ce qui forme la chevelure blanche de la comète, aussi appelée la coma. Elle est observable à l'oeil nu. Ce que peu de personnes savent, c'est l'existence d'une seconde queue : la queue composée d'un plasma issu des interactions avec les vents solaires chargés d'ions. Elle est bleutée, et difficilement observable. Les queues des comètes s'étendent sur des distances considérables (de l'ordre du million de kilomètres).

La comète 67P Churyumov-Gerasimenko mesure entre 3 et 5 km de diamètre, et tourne sur elle-même avec une période de 12,4 h, pour une période héliocentrique de 6,59 ans. Son aphélie est située à une distance de 5,73 ua, et sa périhélie à une distance de 1,3 ua.

### 2.2 Rosetta

Rosetta constitue l'orbiteur de la mission éponyme (voir Figure 2.2<sup>4</sup>). L'orbiteur est l'une des deux parties de la sonde, qui reste orbiter autour de la comète, pendant que l'atterrisseur Philae mènera sa mission au sol. Son rôle est

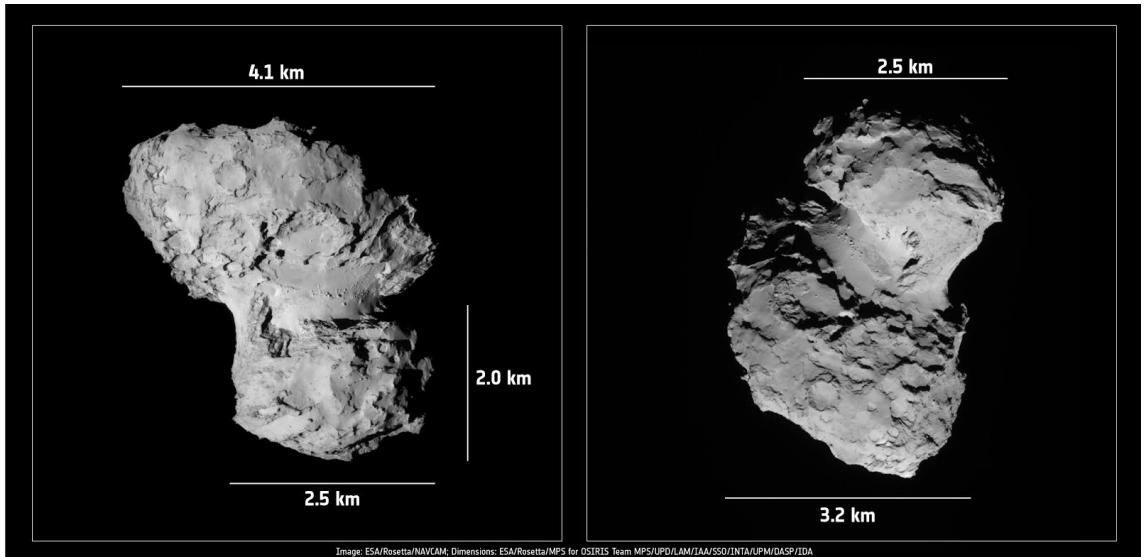
1. M. Churyumov et Mme Gerasimenko, des scientifiques ukrainiens, l'un utilisateur du télescope, l'autre comparatrice d'images, ont découvert cette comète en 1969

2. Jusqu'à environ 500 km, au delà ils sont qualifiés de planètes naines.

3. Leur noyau est d'une taille inférieure à 10 km.

4. Crédits : CNES

FIGURE 2.1 – La comète 67P Churyumov-Gerasimenko et ses dimensions



d'observer aussi bien le noyau de la comète (par des analyses spectrométriques, infrarouges, etc.) que ses interactions avec l'environnement spatial (avec les vents solaires, son atmosphère, etc.) lorsque la comète se rapproche du Soleil. Au total, ce sont 11 instruments qui composent la charge utile scientifique, embarqués sur Rosetta avec l'atterrisseur Philae. L'orbiteur gravite en moyenne à 100 km au dessus de la comète, mais peut descendre jusqu'à 30 km maximum (pour des raisons de sécurité, liées aux gaz et aux poussières), excepté pour la phase SDL de largage de l'atterrisseur.

La masse de Rosetta est de 3 050 kg, dont 1 750 kg de carburants, 165 kg d'instruments, et 97,9 kg pour Philae, pour une envergure de 32 m. La puissance électrique fournie par ses panneaux solaires est estimée à 5,7 kW à 1 ua, et 400 W à 5,25 ua (l'énergie fournie baisse plus elle est loin du Soleil). La mémoire à bord est de 42 Gb, et la communication Terre-Orbiteur se fait via des ondes dans les bandes S (environ 3 GHz) et X (entre 8 et 12 GHz), et la communication avec l'atterrisseur dans la bande S.

#### **ALICE - Ultraviolet Imaging Spectrometer (USA - NASA)**

ALICE (voir Figure 2.3), caractérise la composition du noyau, de la coma et du couplage coma/noyau de la comète 67P. Ceci se fait grâce à des observations spectrales dans les domaines des ultraviolets, de 70 à 205 nm. Ainsi, ALICE peut mesurer l'abondance des gaz rares dans la coma, mais aussi l'abondance des ions majeurs dans la queue de la comète, plus particulièrement la région où les particules chargées des vents solaires interagissent le plus avec l'ionosphère de la comète. ALICE détermine les taux de  $H_2O$ , CO et  $CO_2$  autour du noyau et les propriétés des grains solides de la coma dans les ultraviolets lointains (Far UV), et réalise une carte dans cette gamme d'ultraviolets.

L'instrument en lui-même est une sorte de télescope : la lumière pénètre à travers une ouverture de 40 x 40 mm, puis est recueilli et concentré sur un miroir

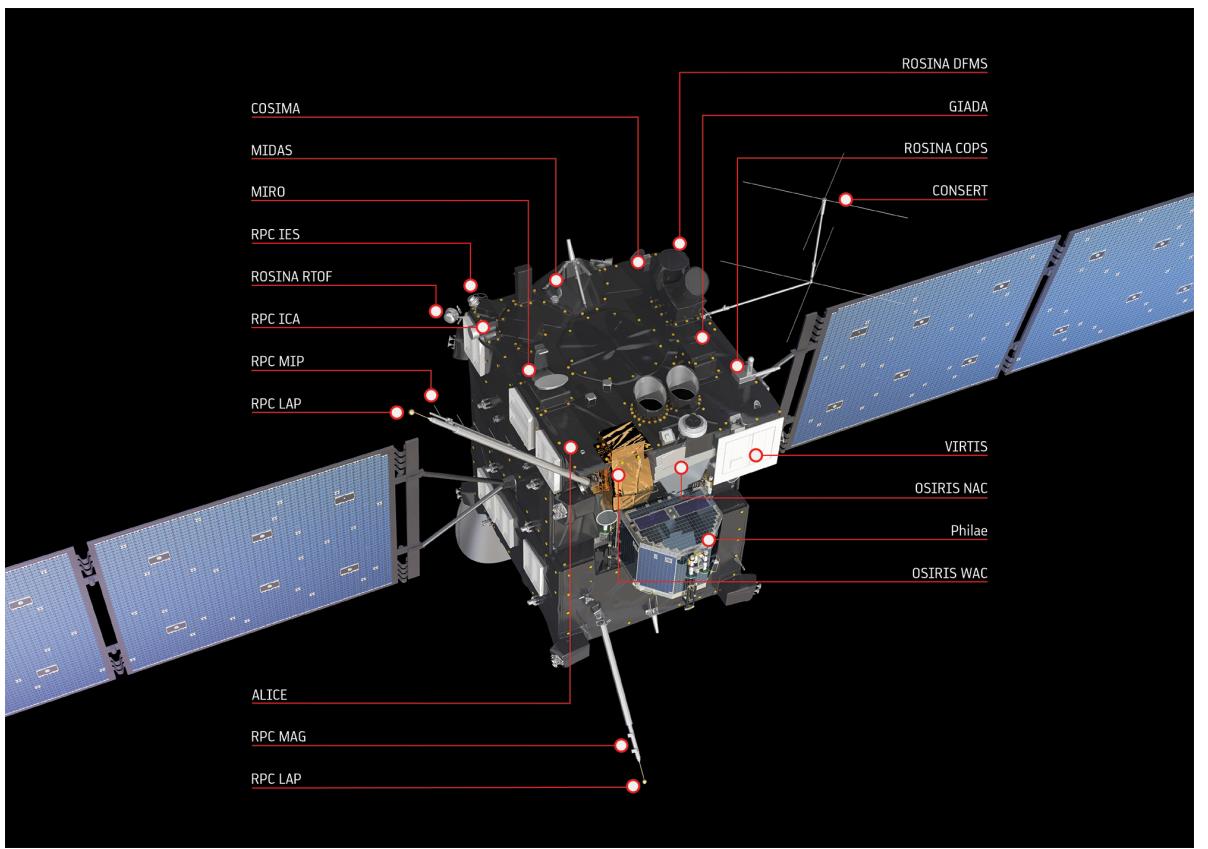


FIGURE 2.2 – Emplacement de tous les instruments sur Rosetta

parabolique. Après avoir traversé l'ouverture, la lumière est dispersée via un réseau<sup>5</sup> et récoltée dans de petits microcanaux composant un détecteur nommé MCP (1020 x 32 pixels) qui permettront l'analyse de cette lumière.

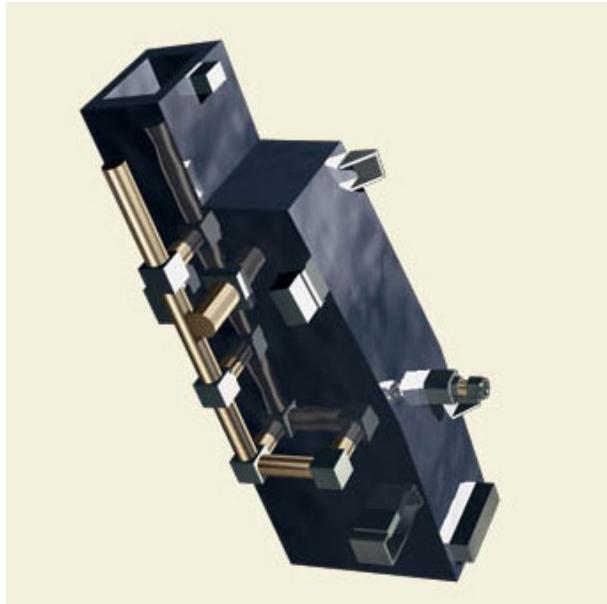


FIGURE 2.3 – L'instrument ALICE

#### **CONSERT - COmet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission (France)**

CONSERT est un émetteur de radio fréquences, chargé d'étudier la tomographie de la comète, autrement dit l'étude de son noyau, et des propriétés diélectriques de la comète. Il fonctionne de pair avec son homologue placé sur Philae.

D'un point de vue fonctionnement, une onde radio (90 MHz, transmission de 25  $\mu s$  avec des cycles de 200 ms) est envoyée depuis l'orbite, et passe à travers la comète, pour arriver (par réflexion par exemple) sur l'autre composante, placée sur l'atterrisseur. Le signal est reçu par Philae, qui analyse les données et les retransmet immédiatement à Rosetta. La variation d'amplitude et de phase mesurée donne donc la composition du noyau et permet aussi de déterminer les propriétés diélectriques de la comète.

#### **COSIMA - COmetary Secondary Ion Mass Analyser of the comet dus (Allemagne)**

COSIMA (voir Figure 2.4) est un spectromètre de masse à ion, équipé d'un collecteur de poussière, d'un canon primaire à ions et d'un microscope optique pour des caractérisations ciblées. La cible justement, est placée sous le microscope, et collecte des poussières ou des particules. Ensuite, les poussières et

---

5. Réseau holographique toroïdal, d'un cercle de Rowland.

particules récoltées sont bombardées par un faisceau pulsé (issu du canon ionique primaire) de ions indium-115 (à une énergie de 10 keV). Le résultat est ensuite extrait et analysé par le spectromètre.



FIGURE 2.4 – L'instrument COSIMA.

#### **GIADA - Grain Impact Analyser and Dust Accumulator (Italie)**

GIADA (voir Figure 2.5<sup>6</sup>) mesure le nombre, la masse, le moment et la vitesse des grains de poussière dans l'environnement proche de la comète. L'instrument analyse aussi bien les grains qui vont du nucleus vers l'espace et ceux arrivant depuis d'autres directions, ayant une trajectoire modifiée à cause de la pression de radiation solaire.

GIADA est composé de trois modules : le module GIADA 1, composé du GDS (Grain Detection System) et de l'IS (Impact Sensor) placés en cascade. Le module GIADA 2 est composé du dernier module : ME (Main Electronics), qui contrôle l'acquisition des données des capteurs et les opérations des sous-systèmes, et enfin le module GIADA 3, chargé des mesures du flux de poussières via cinq micro-balances.

- Le GDS est composé de quatre diodes laser, qui forment un fin faisceau laser. Chaque grain passant dans le faisceau réfléchit et réfracte la lumière, et ces rayons réfléchis ou réfractés sont ensuite détectés par une série de quatre photodiodes placées à 90 degrés des sources. Enfin, en face de chaque photodiode est placé un cône de Winston, pour avoir une sensibilité uniforme dans la zone de détection.
- L'IS est un fin diaphragme d'aluminium équipé de cinq capteurs piézoélectriques, placés derrière les coins et son centre. Lorsqu'un grain touche la fine lame qui compose le diaphragme, cela génère des ondes qui déforment la plaque, et cette déformation est mesurée grâce aux capteurs piézoélectriques. Le déplacement du diaphragme (l'amplitude de l'onde générée) est directement proportionnel à l'impulsion des particules, tout comme le potentiel électrique des piézoélectriques.
- Les microbalances de GIADA 3 sont toutes composées de deux quartz formant un oscillateur (fréquence de 15 MHz), l'un des quartz étant le

---

6. Crédits : nasa.gov

détecteur l'autre la référence. On mesure les battements entre les deux cristaux, et la fréquence de résonance du cristal de quartz agissant comme capteur est modifiée en fonction de l'environnement, en particulier à cause des poussières, notamment à cause de l'accrétion des particules. On obtient ainsi une différence entre les fréquences de résonance des deux cristaux, ce qui nous permet d'en déduire le flux de poussière. L'utilisation du cristal de référence permet de diminuer la dépendance des fluctuations de l'alimentation des capteurs et donc une meilleure sensibilité.

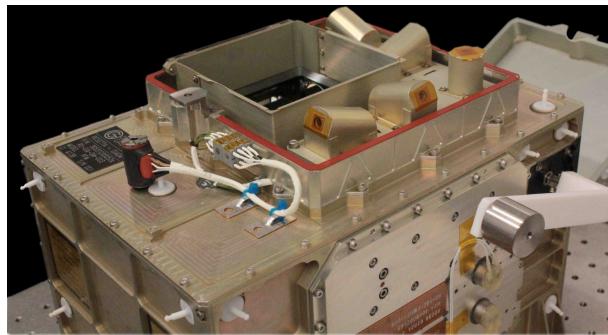


FIGURE 2.5 – L'instrument GIADA.

#### **MIRO - Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter (USA - NASA)**

MIRO (voir Figure 2.6<sup>7</sup>) est un instrument chargé d'étudier la température de la sous-surface du noyau cométaire, le dégazage provenant du noyau (par analyse des raies spectrales des éléments) et aussi l'étude physico-chimique de l'environnement proche du noyau. Il s'agit d'un petit radiotélescope, qui fonctionne dans les micro-ondes, composé d'un miroir principale (parabole de 30 cm de diamètre), d'un récepteur à deux canaux (189 GHz et 562 GHz). Le récepteur est déjà réglé pour étudier plusieurs molécules cométaires : trois raies de l'eau (son isotope principal et d'autres plus rares), trois raies du méthanol  $CH_3OH$ , une raie du monoxyde de carbone CO et une raie de l'ammoniac  $NH_3$ . MIRO vient en complément des instruments ALICE, VIRTIS et OSIRIS.

#### **OSIRIS - Optical, Spectroscopic, Infrared Remote Imaging System (Allemagne)**

OSIRIS (voir Figure 2.7<sup>8</sup>) est une double caméra qui filme dans le visible, les proches infrarouges et les proches ultraviolets. Les deux caméras partagent l'électronique. Le grand angle proche (NAC) de la caméra est conçu pour produire une haute résolution d'images du nucleus de la comète. Chaque caméra est équipée de roues avec des filtres qui lui permet une sélection de différentes longueurs d'ondes.

---

7. Crédits : nasa.gov

8. Crédits : ESA

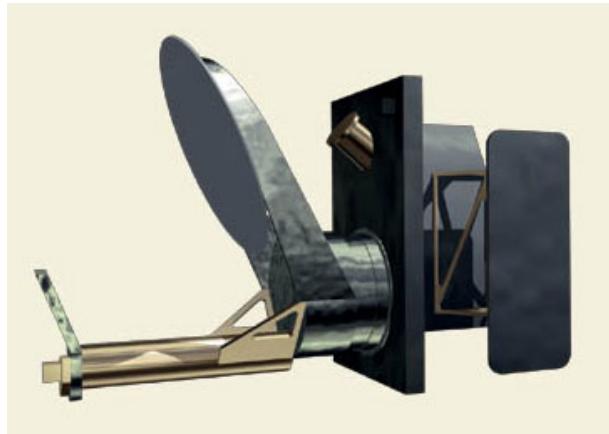


FIGURE 2.6 – L'instrument MIRO.



FIGURE 2.7 – L'instrument NAC (Narrow Angle Camera) d'OSIRIS.

### **ROSINA - Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion Neutral Analysis (Suisse)**

ROSINA (voir les instruments Figure 2.8<sup>9</sup>) est une combinaison de deux spectromètres de masse et d'un capteur de pression. Le spectromètre de masse détermine la composition de l'atmosphère et la ionosphère de la comète, en mesurant la vitesse et la température des ions, et recherche dans quelles réactions ceux-ci interviennent. Le capteur de pression est quant à lui capable de mesurer la pression totale et la pression dynamique (pression exercée par un fluide en mouvement), ce qui est utilisé pour déterminer la densité des gaz.



FIGURE 2.8 – L'un des instruments de ROSINA : le spectromètre de masse.

### **RPC - Rosetta Plasma Consortium (Suède, USA-NASA, Allemagne, France, Royaume-Uni)**

RPC est un groupe de cinq instruments, qui sont chargés d'apporter des données complémentaires sur les plasma et l'environnement autour de 67P. RPC est constitué de cinq capteurs :

- ICA (Ion Composition Analyser) (Suède) : cet instrument doit mesurer la distribution, la vitesse et la masse (en trois dimensions) des ions positifs.
- IES (Ion and Electron Sensor) (NASA) : cet instrument mesure le flux des électrons et des ions dans les plasma entourant la comète, jusqu'à une énergie allant de 1 eV jusqu'à 22 keV.
- LAP (Langmuir Probe) (Suède) : cet instrument doit mesurer la densité, la température et le flux de plasma de la comètes.
- MAG (Magnetometer experiment) (Allemagne) : cet instrument doit mesurer le champ magnétique dans la région où les vents solaires interagissent avec les plasma de la comète. Il étudie aussi tout le champ magnétique du noyau de la comète, en coordination avec l'instrument ROMAP sur Philae.
- MIP (Mutual Impedance Probe) (France) : cet instrument étudie la densité du gaz d'électrons, sa température et sa vitesse dans la coma interne de la comète, en mesurant l'impédance mutuelle entre deux dipôles.

---

9. Crédits : ESA

- PIU (Plasma Interface Unit) (Royaume-Uni) : ce composant est l’interface entre les cinq instruments qui composent RPC et Rosette.

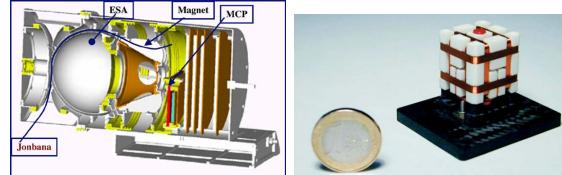


FIGURE 2.9 – Deux instruments de RPC : ICA, MAG

#### **RSI - Radio Science Investigation (Allemagne)**

RSI (voir Figure 2.10<sup>10</sup>) est le système de communication qu’utilise Rosetta avec les stations sur le sol de la Terre. De plus, RSI cherchera les fréquences “shifts” non-dispersives et dispersives (dues à la propagation dans un milieu ionisé donc chargé, donc polarisé), la puissance du signal et la polarisation des ondes porteuses. Les modifications dans ces données lui permettront d’en déduire des informations sur les forces perturbatrices qui ont agit sur le signal et donc d’obtenir des informations supplémentaires.

Les stations sol sont au nombre de trois : une en Australie (35 m), une en Californie (34 m) et une dernière en Espagne (34 m). Le signal émit est dans les bandes S et X des fréquences.



FIGURE 2.10 – L’instrument RSI

---

10. Crédits : ESA

### **VIRTIS - Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer (Italie)**

VIRTIS (voir Figure 2.11<sup>11</sup>) est chargé d'étudier le noyau de la comète, d'identifier les espèces gazeuses, la nature des solides à la surface de la comète. C'est un spectromètre qui combine trois canaux de données d'un instrument. Deux sont des canaux dédiés à la cartographie spectrale de la comète, le troisième est dédié à la spectroscopie.

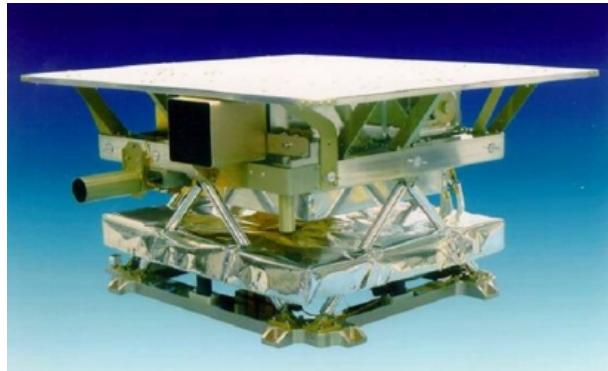


FIGURE 2.11 – L'instrument VIRTIS

## **2.3 Philae**

Philae constitue l'atterrisseur de la mission Rosetta (voir Figure 2.12<sup>12</sup>). Ses objectifs est d'étudier la structure du noyau interne et de faire plusieurs prélèvements en vue d'observer leurs compositions minéralogiques, isotopique et chimiques. Il est le fruit entre une collaboration des pays membres de l'ESA et de la NASA. Il présente la forme d'un cylindre polygonal d'une hauteur de 80cm pour une masse de 97,9 kg, dont 26,7 kg de matériel scientifique. Il possède en tout dix instruments de mesures.

### **APXS - Alpha Proton X-Ray Spectrometer (Allemagne)**

Le but d'APXS (voir Figure 2.13<sup>13</sup>) est la détermination de la composition chimique du site d'atterrissage et son altération potentielle au cours de l'approche de la comète du Soleil. C'est une spectroscopie alpha en mode rayonnement alpha et une spectroscopie alpha et X en mode rayonnement X.

### **CIVA - Comet Infrared and Visible Analyser (France)**

Cet instrument se compose de sept caméras miniaturisées identiques (voir l'une d'entre elles Figure 2.14<sup>14</sup>) qui réalisent des images panoramiques de la surfaces et fait une reconstitution 3D de la structure local de la surface. CIVA-M possède un microscope visible et un imageur hyperspectral dans le

---

11. Crédits : ESA

12. Crédits : cnes.fr

13. Crédits : phy.org

14. Crédits : www.tdg.ch

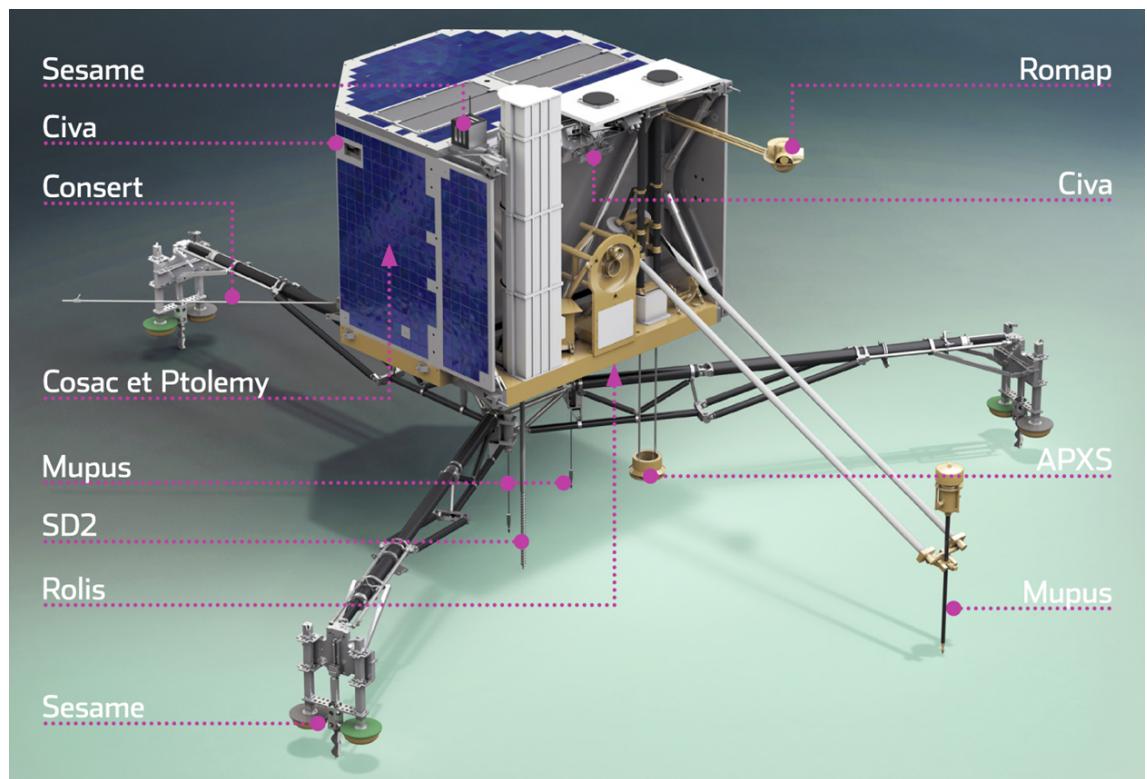


FIGURE 2.12 – Emplacement de tous les instruments sur Philae.

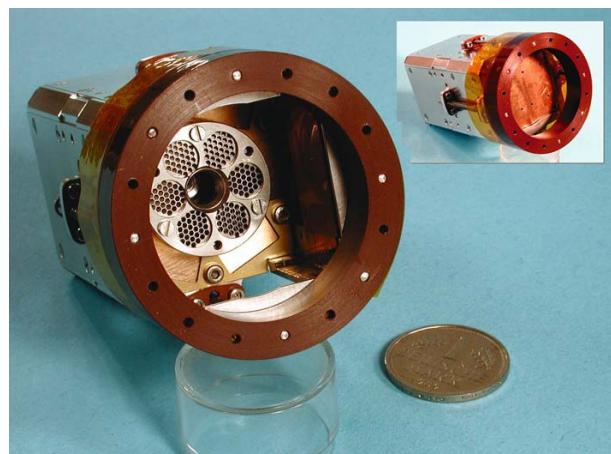


FIGURE 2.13 – L'instrument APXS

proche infrarouge afin d'étudier la composition moléculaire et minéralogique de la comète ainsi que la texture et l'albédo (pouvoir réfléchissant d'une surface), la réflectivité, des échantillons collectés de la surface.



FIGURE 2.14 – L'une des 7 caméras composant CIVA

#### **CONCERT - Comet Nucleus Sounding Experiment by Radio wave Transmission (France)**

Son objectif est la réalisation de la tomographie du noyau de la planète. De paire avec Rosetta, c'est par le biais d'une onde envoyée à travers le noyau qu'il détermine la structure interne du noyau et les propriétés diélectriques du noyau. Il est aussi présent sur l'orbiteur.

#### **COSAC - COmetary SAmpling and Composition experiment (Allemagne)**

COSAC (voir Figure 2.14) identifiera et quantifiera les composés cométaires volatils incluant les molécules organiques complexes. C'est un chromatographe en phase gazeuse multi-colonnes, couplé à un spectromètre de masse à temps de vol de type réflectron linéaire.



FIGURE 2.15 – L'instrument COSAC, à gauche seul, à droite dans Philae.

### **MUPUS - MUlti-PUrpose Sensors for Surface and Sub-surface science (Allemagne)**

MUPUS (voir Figure 2.16) cherche à comprendre les propriétés et la stratification de la matière proche de la surface lorsqu'elle évolue en fonction de la rotation de la comète et de sa distance au Soleil. De plus, il étudie l'équilibre énergétique à la surface et ses variations avec le temps et la profondeur ainsi que l'équilibre de masse à la surface et son évolution dans le temps. Il est surtout formé d'un pénétrateur déployé par un bras. A celui-ci, il est additionné de capteurs de température et d'accélérateurs dans les harpons, de capteurs de profondeur et de température dans le pénétrateur, d'un système pour réaliser la cartographie thermique de surface.



FIGURE 2.16 – L'instrument MUPUS.

### **PTOLEMY (Royaume-Uni)**

MUPUS (voir Figure 2.17) a pour but de comprendre la géochimie par détermination de leur nature, leur distribution et leur composition en isotopes stables d'éléments légers tels que l'oxygène, le carbone, l'azote ou bien l'hy-

drogène. Il est composé de trois colonnes chromatographiques en phases gazeuses.

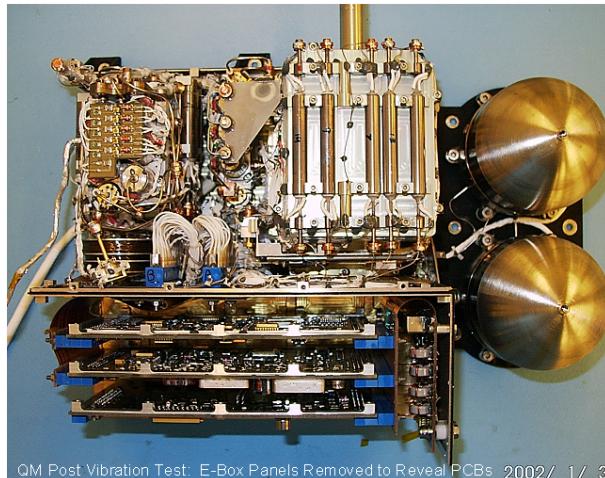


FIGURE 2.17 – L’instrument PTOLEMY

#### **ROLIS - ROsetta Lander Imaging System (Allemagne)**

C’est une caméra de descente (voir Figure 2.18) prenant des clichés préliminaires de l’environnement lors de l’atterrissement sur Chury (voir Figure 2.19). A terre, ROLIS procède aux études haute-résolution de la morphologie et de la minéralogie de la surface. Il est constitué d’une caméra CCD miniature permettant une imagerie multi-spectrale dans 4 bandes spectrales (470, 530, 640 et 870 nm) fournies par un système d’éclairage.

#### **ROMAP - Rosetta Lander Magnetometer and Plasma Monitor (Allemagne, Italie)**

ROMAP (voir Figure 2.20<sup>15</sup>) est une expérience multi-capteurs. Le champ magnétique est mesuré par un magnétomètre à saturation de flux. Un analyseur électrostatique à coupes de Faraday intégrées mesure les ions et électrons. La pression locale est mesurée par des capteurs Pirani et Penning. Les capteurs sont situés sur un mât court. Les objectifs scientifiques sont d’étudier le champ magnétique et les ondes plasma émises par la surface en fonction de la distance de la comète au soleil.

#### **SD2 - Sampling, Drilling and Distribution (Italie)**

Le sous-système SD2 est en charge de collecter des échantillons à différentes profondeurs sous la surface de la comète et de les distribuer à 3 instruments pour analyse (Civa, Cosac, Ptolemy). SD2 peut creuser jusqu’à 250 mm sous la surface de la comète. Il transporte ensuite chaque échantillon à un carrousel qui fournit les échantillons en différentes positions : un spectromètre, une sonde de contrôle

---

15. Crédits : ESA



FIGURE 2.18 – L'instrument ROLIS.

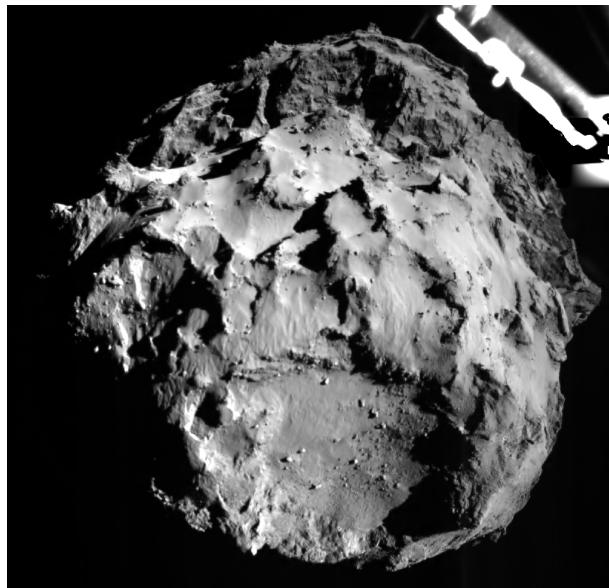
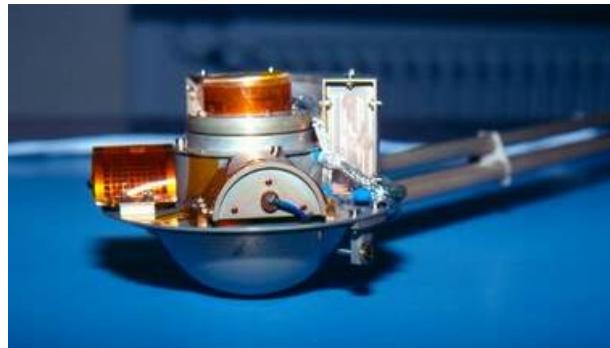


FIGURE 2.19 – Image prise par ROLIS.

FIGURE 2.20 – L'instrument ROMAP.



de volume, des fours à haute et moyenne température et un point de nettoyage. SD2 est installé sur le balcon de Philae où il est exposé à l'environnement cométaire.

#### **SESAME - Surface Electrice Sounding and Acoustic Monitoring Experiment (Allemagne, Finlande)**

SESAME est formé de trois instruments mesurant les propriétés des couches externes de la comète :

- l'instrument CASSE (Comet Acoustic Surface Sounding Experiment), qui mesure la manière dont passe le bruit à travers la surface ;
- l'instrument DIM (DUST Impact Monitor), qui mesure la poussière retombant sur la surface ;
- l'instrument PP (Permittivity Probe), qui étudie les caractéristiques électriques.

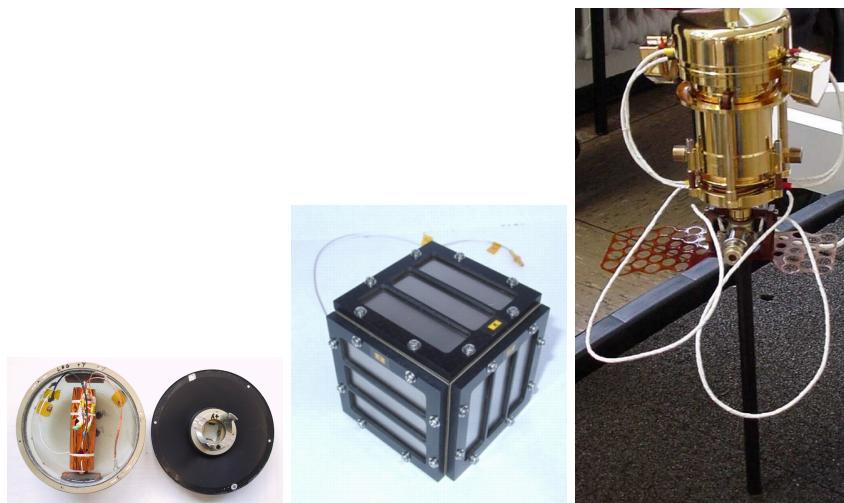


FIGURE 2.21 – Les instruments de SESAME : CASSE, DIM et PP

## Chapitre 3

# Problèmes, solutions technologiques et résultats

### 3.1 Défis technologiques, problèmes et solutions

#### 3.1.1 Un très long voyage

Les comètes sont des astres très particuliers... Et difficiles à étudier de près. Jusqu'alors, bien peu de missions se sont autant approchées d'une comète, ne faisant que des survols. Mais la mission Rosetta avait pour objectif d'orbiter autour de la comète. Il fallait donc la rattraper et parvenir sur son orbite. Afin d'y parvenir, la sonde a effectué pas moins de quatre assistances gravitationnelles : trois avec la Terre et une avec Mars. Au total, elle a parcouru 6,4 milliards de kilomètres, pendant dix ans<sup>1</sup>.

Il fallait donc tout d'abord assurer un moyen de propulsion : 24 petits moteurs à ergols liquides<sup>2</sup>, pour une masse de 1720 kg de carburants : 660 kg de monométhylhydrazine et 1060 kg de peroxyde d'azote, permettent d'effectuer des corrections de trajectoire et la mise en orbite et d'assurer la stabilisation trois-axes. Le contrôle d'attitude est maintenu par quatre roues à inertie, ainsi que deux senseurs stellaires, des senseurs solaires, des caméras de navigation (NAVCAM) et trois gyrolasers.

L'alimentation est assurée par des panneaux solaires, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Epaisseur :  $10\mu m$  ; Largeur (d'une cellule) : 37,75 mm ; Longueur (d'une cellule) : 61,95 mm. Il y a 200 cellules de Si de faible intensité et basse température (LILT) par panneau solaire.
- Une protection de  $100\mu m$  de verre protège les panneaux solaires.
- Les panneaux produisent un travail de 395 W à 5,25 UA, et 850 W à 3,4 UA.
- L'énergie électrique est stockée dans quatre batteries NiCd (10Ah), qui fournissent une tension de 28 V.
- Enfin, le système de régulation thermique doit maintenir l'intérieur de la

1. Une très bonne animation de l'ESA permet de visualiser le chemin parcouru par Rosetta, voir : [sci.esa.int/where\\_is\\_rossetta/](http://sci.esa.int/where_is_rossetta/)

2. D'une poussée de 10 N chacun

sonde à une température de  $20^{\circ}\text{C}$  environ, c'est pourquoi elle est munie de 14 lamelles réparties sur  $2,5\text{ m}^2$ .

### 3.1.2 Le rendez-vous

Le rendez-vous entre la sonde et la comète s'est déroulé en plusieurs étapes, résumées dans le tableau suivant.

Date	Distance de la comète [km]	$\Delta V[\text{m.s}^{-1}]$	Vitesse relative par rapport à la comète [ $\text{m.s}^{-1}$ ]
7/05/14	$1,92 \cdot 10^5$	20	754
21/05/14	$1,01 \cdot 10^5$	290,89	463
4/06/14	425 250	269,5	192,1
18/06/14	194 846	90,76	101,3
2/07/14	51 707	58,80	43
9/07/14	22 314	24,91	18,4
16/07/14	9 590	10,65	7,9
23/07/14	4126	4,62	1
3/08/14	•	3,2	3,2
6/08/14	100	0	0

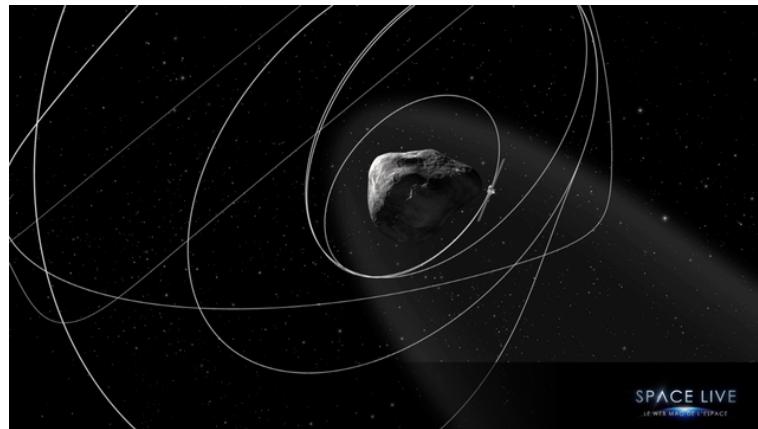


FIGURE 3.1 – Une vue des manœuvres de rendez-vous.

La dernière manœuvre de rendez-vous effectuée, Rosetta devait se mettre en orbite autour de la comète, ce qui ne pouvait se faire qu'avec les données sur le champ gravitationnel de 67P C-G. Rosetta se trouve à une altitude de 100 km pour obtenir ces informations, et reste autour de 67P grâce à ses propulseurs, qui lui font parcourir des orbites triangulaires. Une fois les données acquises, la sonde peut se rapprocher jusqu'à 30 km, ce qui était suffisant pour assurer une orbite elliptique, mais à une vitesse de rotation très faible ( $10\text{ cm.s}^{-1}$ ). Plus tard, l'altitude de Rosetta sera fixée à 80 km puis à 50 km, mais à nouveau par des orbites triangulaires.

### 3.1.3 L'atterrissement de Philae

La sélection du site d'atterrissement s'est faite selon plusieurs critères :

- L'horizon doit être dégagé pour les communications Rosetta-Philae ;

- Le site doit pouvoir bénéficier d’au moins 6 heures d’éclairage par rotation de la comète ;
- Le site doit pouvoir bénéficier d’un cycle jour-nuit pour mesurer l’amplitude thermique ;
- Le site doit être plat, avec une inclinaison maximal de 30 ° à l’horizontale ;
- Le site ne doit pas comporter de gros rochers ou de crevasses.

Entre tous les sites (cf Figure 1.2), c’est le site J (cf Figure 1.3) qui fut choisi. Le 12 novembre 2014, Philae est éjecté et tombe pendant 7 heures et 2 minutes, pour arriver à une vitesse de  $0,95m.s^{-1}$  au niveau du sol. L’atterrissement est réussi, mais non conforme aux prévisions.

La faible masse de Philae et la faible pesanteur de la comète devaient absolument prises en compte pour éviter que Philae ne rebondisse et reparte dans l’espace. Pour cela, un propulseur à gaz froid situé au sommet de la sonde devait s’activer dès que Philae s’était posé pour le plaquer contre le sol. Malheureusement, ce dernier ne se déclenche pas, tout comme les deux harpons qui devaient assurer l’ancrage. Ainsi, Philae fait un rebond jusqu’à une hauteur d’environ 1 km (pour une durée de 2 heures), puis un autre pendant quelques minutes, qui s’achève contre une paroi.

A l’arrivée, Philae est à environ 1 km du site prévu, et est incliné (l’un des pieds étant surélevé), et quelques panneaux solaires sont donc non éclairés.

Curieusement, on pourrait penser que cet atterrissage était raté... Mais en réalité, il a apporté de nouvelles données sur la composition de la comète ! En effet, le sol de 67P C-G était (relativement) mou, sans quoi le rebond aurait été bien plus violent... Et aurait éjecté la sonde dans l’espace.

## 3.2 Des premiers résultats

### 3.2.1 Résultats de Rosetta - MIRO, ROSINA, VIRTIS

Pour étudier la composition de la coma de 67P C-G, plusieurs instruments ont été conçus : VIRTIS, MIRO et ROSINA. Dès le 10 décembre 2014, les scientifiques annoncèrent des résultats qui venaient changer une idée préconçue sur les comètes : les comètes ne sont pas à l’origine de la présence de l’eau sur Terre. En effet, les résultats de ROSINA sont formels : l’eau présente sur 67P C-G n’est pas la même que sur Terre. Pour comprendre cela, il faut se pencher sur la composition de l’eau, notamment l’un de ses éléments, l’hydrogène : l’hydrogène de l’eau que l’on connaît est un élément doté d’un unique proton (et d’un électron). Cependant, l’hydrogène de 67P C-G est principalement un isotope de l’hydrogène : son noyau est composé d’un proton et d’un neutron. Les ratios Hydrogène/Deutérium sont ainsi très différents entre la Terre et la comète. Comme le montre la Figure 3.2, le ratio de 67P C-G est d’une valeur de  $5,3 \pm 0,7.10^{-4}$ , tandis que pour la Terre, a une valeur de  $1,55.10^{-4}$ . Ce ratio, hautement enrichi en Deutérium en comparaison avec la Terre, contredit donc l’hypothèse de l’origine cométaire de l’eau. De plus, le ”réservoir” de comètes du Système Solaire est situé dans le nuage d’Oort, à plus de  $10^5 ua$  de notre planète, et est la source de comètes à grandes périodes, comme la comète de Halley.<sup>3</sup> La comète 67P C-G est quant à elle originaire de la ceinture de Kuiper, située à 50 ua.

---

3. Rappelons que la période de 67P C-G est de 6,59 ans.

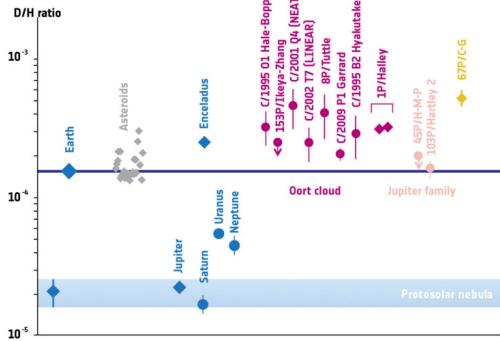
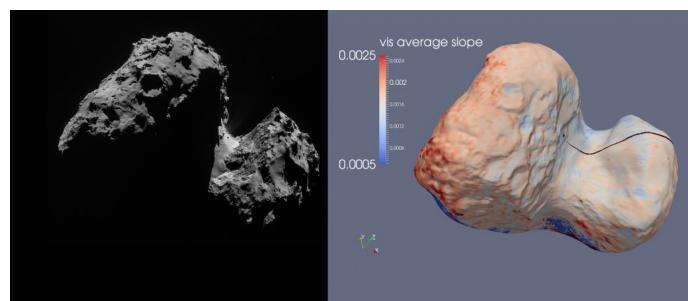


FIGURE 3.2 – Le ratio D/H pour différents corps célestes.

En Octobre 2014, la région située autour du "cou" de la comète est devenu assez actif (notamment grâce aux vents solaires qui entraînent la sublimation des gaz congelés) pour que de l'eau et du dioxyde de carbone soient détectés par VIRTIS, confirmant la présence d'eau dans la coma, détectée par MIRO en Juin 2014.

Ce dernier aurait mesuré des pertes de  $1L.s^{-1}$  allant jusqu'à un maximum de  $5L.s^{-1}$  en Septembre, ce qui est bien plus que les  $300mL.s^{-1}$  mesurés en Juin. De plus, la localisation de ces éléments ne provient pas de n'importe où, elles sont principalement situées dans le "cou" de la comète, ce qui pourrait être lié à la surface de la comète : plus celle-ci est plate, plus les éléments ont une forte probabilité de s'y trouver. On peut d'ailleurs observer une cartographie de ces pentes sur la Figure 3.3 : plus la valeur des dénivélés est basse, plus la présence d'une activité importante était constatée.

FIGURE 3.3 – Carte de la répartition des dénivélés de 67P C-G



Par ailleurs, les observations infrarouges ont permis la découverte de macromolécules organiques sur toute la surface du noyau de la comète. Certains de ces composés sont similaires aux acides carboxyles<sup>4</sup>, présents dans les aminoacides.

4. Ou plus exactement aux polymères d'acides carboxyles.

Les amino-acides ont déjà été observés sur des résidus de comètes ou sur des météorites primordiales, mais c'est la première fois que ces composés sont directement observés sur la surface d'une comète. De plus, la distribution générale des composants sur la surface suggère qu'ils sont relativement abondants dans les matériaux qui ont formé le noyau de la comète.

### 3.2.2 Résultats de Philae - COSAC, PTOLEMY, SD2

De tous les instruments embarqués sur Philae, nous nous concentrerons rapidement sur les résultats de trois d'entre eux : COSAC, PTOLEMY et SD2. Le dernier est un instrument dévolué à la perforation du sol, autrement dit du prélèvement d'échantillons pour que les deux autres puissent les étudier. Tout d'abord, COSAC - un chromatographe-spectromètre de masse analysant les molécules complexes - aurait détecté la présence de plusieurs molécules auparavant peu présentes (selon les mesures) sur les autres comètes. Citons par exemple  $CH_3CHO$ ,  $HCONH_2$ ,  $CH_2(OH)CH_2(OH)$ ,  $CH_3NH_2$  et  $C_2H_5NH_2$ . Mais d'autres molécules ont aussi été découvertes sur le sol d'une comète :  $CH_3NCO$ ,  $CH_3COCH_3$ ,  $C_2H_5CHO$  et  $CH_3CONH_2$ . Toutes ces molécules sont prédictes par un modèle résumé sur la Figure 3.4.

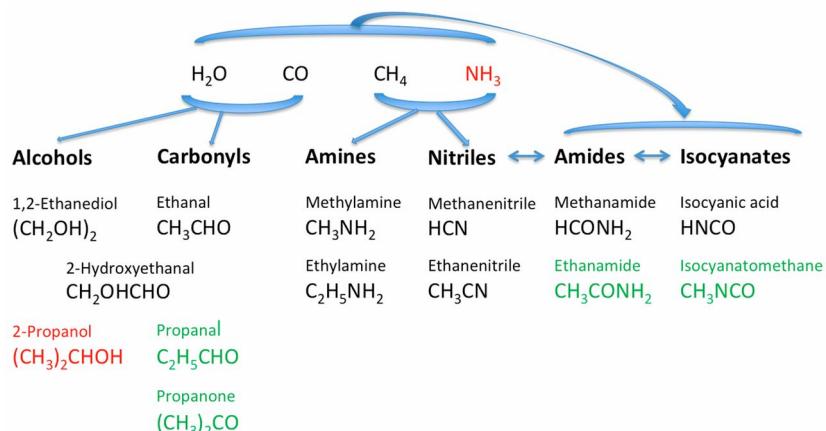


FIGURE 3.4 – Chemins possibles de formation des composants de COSAC.

Mais ce n'est pas tout ! PTOLEMY a lui aussi détecté des composants dotés de groupes  $CH_2$  et O supplémentaires, et a aussi constaté l'absence de composés aromatiques (benzène par exemple) ou d'espèces soufrées, ainsi qu'une très faible concentration en matériaux azotés.

Mais que veut donc dire tout cela ? La grande présence de molécules carbonées est remarquable, et l'hypothèse avançant que l'origine de la vie proviendrait des comètes n'est sans doute pas sans fondements, ces molécules complexes étant des maillons élémentaires de la vie sur Terre.

# Conclusion

Rosetta s'est voulue être l'une des missions les plus ambitieuses que les agences spatiales mondiales eurent à orchestrer. Cherchant à approfondir le mystère du vivant et de son apparition sur Terre, ancrée dans un programme spatial aux grandes ambitions, elle nous dévoile, par ses prouesses technologiques et ses résultats, notre capacité à repousser plus loin les limites de la recherche. Les connaissances sur les comètes sont à la hauteur des attentes des scientifiques. Tous les moyens, que cela soit les innovations utilisées ou les études dans le domaine de l'astrophysique, ont permis l'observation et la collecte d'informations sur ces astres, antérieurs à notre système solaire et sources d'intrigues depuis des siècles. Les appétences de Rosetta dépassent la seule fouille de molécules carbonées mais se porte bien sur l'ensemble de la comète. Francis Rocard, responsable du programme Rosetta pour le CNES disait d'ailleurs : "L'intérêt de rester longtemps à proximité de la comète, c'est de pouvoir étudier l'émergence de son activité et de son évolution au fur et à mesure qu'elle se rapproche puis s'éloigne à nouveau du Soleil". De nombreuses découvertes attendent sûrement les chercheurs affiliés au projet. C'est avec hâte que la communauté scientifique se prépare à accueillir les résultats finaux de la mission Rosetta.

# Bibliographie

- [1] K. Altwegg. 67p/churyumov-gerasimenko, a jupiter family comet with a high d/h ratio. *Science Express*, 10 December 2014.
- [2] AGLE D.C. BAUER M., TAYLOR M. Rosetta's comet 'sweats' two glasses of water a second, 2014.
- [3] GOESMANN F. Organic compounds on comet 67p/churyumov-gerasimenko revealed by cosac mass spectrometry. 2015.
- [4] KOSCHNY KUHRT RICHTER GLASSMEIER, BOEHNHARDT. The rosetta mission : Flying towards the origin of the solar system, 2006.
- [5] WRIGHT I.P. Cho-bearing organic compounds at the surface of 67p/churyumov-gerasimenko revealed by ptolemy. 2015.